ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی کہانی

جوئل ای موؤر

یہ مضمون مشہور جریدے "نیچر" میں 2010 میں شائع ہوا جسے محمد علی شہباز نے اردو قارئین کے لئے ترجمہ کیا۔

بنیادی گزارشات

کچھ انسولیٹروں Insulators کی سطحوں پر کچھ اجنبی دھاتی حالتیں exotic states پائی جاتی ہیں۔ یہ حالتیں ٹوپولوجیکل اثرات کے ذریعہ بنتی ہیں جن کی وجہ سے انسولیٹر کی سطح پر سفر کرنے والے الیکٹرانوں کے راستے میں نجاستوں Impurities سے مزاحمت کا اثر زائل ہوجاتا ہے۔ اس طرح کے ٹوپولوجیکل انسولیٹر نئے مادی مظاہر اور ذرات پیدا کرنے کے لیے نئے طریقے فراہم کر سکتے ہیں جن سے ممکنہ طور پر اسپنٹرونکس Spintronics اور کوانٹم کمپیوٹنگ Quantum Computing جیسی تکنیکی ایپلی کیشنز میں فائدہ لیا جاسکتا ہے۔

کنڈینسڈ میٹر فزکس کے بہت سے پہلوؤں کا تعلق یہ سمجھنے سے ہے کہ جب بہت بڑی تعداد میں سادہ اجزاء، جیسے آئن، مقناطیس یا الیکٹران ایک دوسرے کے ساتھ تعامل کرتے ہیں تو ان کی اجتماعی حالت میں آرڈر یا نظم کیسے ابھرتا ہے۔ کرسٹل اور مقناطیس جیسی منظم حالتوں میں، آرڈر کو ہم آہنگی یا سمٹری Symmetry کے ٹوٹنے کے عمل سے بیان کیا جاتا ہے۔ وہ یوں کہ ایک کرسٹل میں موجود آئنز Ions ایک دوسرے سے خاص فاصلے سے

مسلسل جبڑے ہوتے ہیں جسکی وجہ ان کے مابین پائے جانے والے الیکٹروسٹیٹک تعاملات ہوتے ہیں۔ سمٹری ٹوٹنے کے عمل میں ان کرسٹلز میں موجود روٹیشن اور ٹرانسلیشن کی Continuous سمٹری کو توڑا جاتا ہے۔ عام مقناطیسوں میں، سپن اسپیس کی روٹیشنل سمٹری سمیت ٹائم ریورسل سمٹری Time Reversal Symmetry ختم ہوجاتی ہے۔

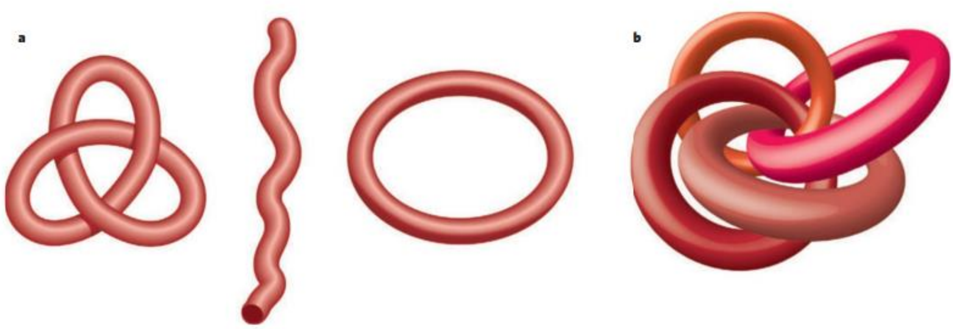
1980 کی دہائی میں ایک اہم دریافت یہ ہوئی کہ اگر الیکٹرانوں کی حرکت دو جہتوں تک محدود ہو اور انہیں ایک مضبوط مقناطیسی میدان کے تابع کیا جائے تو ایک بالکل مختلف نظم ابھر کر سامنے آتا ہے جو پھر کوانٹم ہال اثر کا باعث بنتا ہے، اسے ٹوپولاجیکل آرڈر کہتے ہیں۔ اس آرڈر کے نتائج میں توانائی کے ضیاع کے بغیر برقی بہاؤ اور ایسے ذرات کا ملنا شامل ہے جن پر جزوی چارج ہوتا ہے اور وہ کسری شماریات Fractional Statistics کے اصولوں کی پابندی کرتے ہیں۔ پچھلے کچھ سالوں کی ایک اہم دریافت یہ ہے کہ کچھ سہہ جہتی (3D) مادوں میں بھی ٹوپولوجیکل آرڈر پایا جاتا ہے۔ ان مادوں میں، مقناطیسی میدان کا کردار سپن مدار تعاملات نبھاتے ہیں اور یہ تعاملات تمام ٹھوس اشیاء کی ایک داخلی خاصیت ہے (یعنی ہر ٹھوس میں موجود ہیں)۔ ان مادوں کو ٹوپولوجیکل انسولیٹر کا نام دیا گیا ہے کیونکہ یہ 'بلک' 'Bulk' میں تو انسولیٹر ہوتے ہیں لیکن ٹوپولوجیکل آرڈر کی وجہ سے ان کی سطحوں پر اجنبی دھاتی حالتیں موجود ہوتی ہیں۔

اس مضمون میں، ہم ان بنیادی تصورات کا ایک جائزہ فراہم کریں گے جو ٹوپولوجیکل انسولیٹروں کے حالیہ مطالعے پر مبنی ہیں۔ ہم دیکھیں گے کہ کچھ انسولیٹروں کو کیا چیز 'ٹوپولوجیکل' بناتی ہے۔ اس تیزی سے ترقی پذیر شعبے کی ایک مختصر تاریخ کی وضاحت کے بعد ہم ٹوپولوجیکل انسولیٹروں پر تجربات میں کی گئی حالیہ پیشرفت جس میں بلک اور نینو اسٹرکچر Nanostructure مادوں کی نظریاتی فہم پر بات ہوگی۔ آخر میں ہم سمجھنے کی کوشش کریں

گے کہ دنیا بھر میں بہت سے تحقیقی گروپس ایسے نئے ذرات اور نئی مادی حالتیں جن کا ممکنہ اطلاق کوانٹم کمپیوٹنگ میں ہوسکتا ہے، پیدا کرنے کے لیے ٹوپولوجیکل انسولیٹر استعمال کرنے کی کوششیں کیوں کر رہے ہیں۔

ٹوپولوجیکل انسولیٹر پر ایک ابتدائیہ

ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی سب سے سادہ وضاحت یہ کہ یہ ایک ایسا انسولیٹر ہے کہ جب اسے خلاء یا 'عام' انسولیٹر کے ساتھ جوڑا جاتا ہے تو ہمیشہ اس پر ایک دھاتی سطح Mettalic Surface بنتی ہے۔ یہ دھاتی سطحیں ٹوپولوجیکل انویریئنٹس Topological Invariants کی وجہ سے پیدا ہوتی ہیں۔ انویرئینٹس وہ مقداریں ہیں جو اس وقت تک تبدیل نہیں ہو سکتیں جب تک کہ کوئی مادّہ انسولیٹر رہتا ہے۔ دھاتی سطحوں کی موجودگی کو سمجھنے کے لئے تصویر 1a پیش کی گئی ہے۔



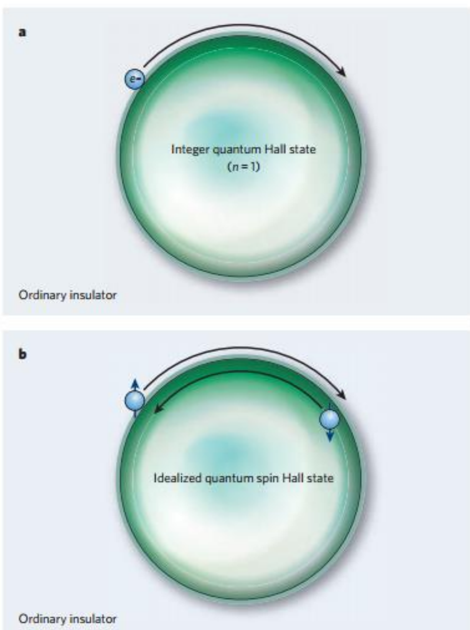
ایک ٹریفوائل کی گرہ Trefoil Knot کو ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی نمائندگی کرنے کے لیے اور ایک بند لوپ closed loop کو عام انسولیٹر کی نمائندگی کرنے کے لیے استعمال کیا جاتا ہے۔ ٹوپولوجی ریاضی کی ایک شاخ ہے جو اشیاء کی ان خصوصیات کا مطالعہ کرتی ہے جو ہموار تبدیلیوں کے تحت غیر متغیر ہوتی ہیں، جس کی ایک بہترین مثال ایک ڈونٹ donut ہے جسے کچھ ہموار تبدیلیاں کرتے ہوئے ایک کافی کے کپ میں بدلا جا سکتا ہے۔ ڈونٹ / کافی کپ کی جوڑی کے بر عکس، ٹریفوئل کی گرہ اور بند لوپ میں مختلف ٹوپولوجیکل انویریئنٹس ہوتے ہیں لہذا رسی (یا

تار) کو جیسے بھی کھینچا یا موڑا جائے، دونوں میں سے کسی کو بھی کاٹے بغیر ایک دوسرے کی شکل میں تبدیل نہیں کیا جا سکتا۔ اس کے باوجود ان کے یہ انویرینٹس، ٹوپولوجیکل اور عام انسولیٹروں کی درمیانی حد کو عبور کرنے کے عمل میں تبدیل ہو ہی جاتے ہیں، لہذا ایسے مادوں کی سطح انسولیٹر نہیں رہ سکتی۔ یہ بالکل گرہ کاٹنے والی مثال کے مترادف ہے۔

ٹوپولوجیکل انسولیٹر میں، وہ جزو جو 'گرہ بند' ہوتا ہے وہ الیکٹران کا ویو فنکشن ہے جو کہ مومینٹم سپیس میں بہتا ہے۔ اس گرہ کے ساتھ ٹوپولوجیکل انویریئنٹس منسلک ہیں (عام طور پر یہ ویو فنکشن پر مشتمل انٹیگرلز Integrals میں ظاہر ہوتے ہیں) جو اس وقت تک تبدیل نہیں ہو سکتے جب تک کہ مادہ انسولیٹر رہتا ہے۔ حتیٰ کہ جب عام انسولیٹر اور ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی باہمی سطح جوہری حد تک تیز ہو اور ٹوپولوجی کی تسلسلcontinuum والی وضاحت قابل اطلاق نہ لگتی ہو تب بھی اس سطح میں دھاتی نما ڈی لوکلائزڈdelocalized ویو فنکشن موجود ہوتے ہیں۔ تصویر 1b میں، سہ جہتی الیکٹرانک ساخت میں گرہ لگانے کی سادہ مثال دی گئی ہے۔ ایک مقبوضہOcuupied الیکٹرانک بینڈ کے لیے اور ایک خالی بینڈ کیلئے سہ جہتی مومینٹم اسپیس میں ہر ایک نقطے پر ایک یونٹ ویکٹرunit vectorمنسلک ہوتا ہے جو کہ مقبوضہ بینڈ کی نمائندگی کرتا ہے، اور تصویر 1b میں دکھایا گیاHopf نقشہ ٹوپولوجی میں ایک غیر معمولی مثال ہے۔

ماضی کا سبق

ٹوپولوجی کے تبدیل ہونے سے کسی مادے کی سطح پر اجنبی دھاتی حالتیں بننے کا عمل اس بات کی ایک اہم تجرباتی دلیل ہے کہ وہ مادہ واقعی ایک ٹوپولوجیکل انسولیٹر ہے۔ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی خصوصیات کی وضاحت کے لیے ہم ان تاریخی پیشرفتوں کے ایک مختصر جائزے سے بات شروع کریں گے جن کی وجہ سے نظریاتی طور پر یہ پیشین گوئیاں ہوئیں کہ ٹوپولوجیکل انسولیٹر کا وجود ممکن ہے۔اس کی ایک سادہ مثال کوانٹم ہال قطرے Quantum Hall Droplet کی سطح پر دھاتی حالت کا ملنا ہے جو کہ دو جہتی ٹوپولوجیکل آرڈر کی پہلی خبر تھی۔کوانٹم ہال کنارے edges ایسی کامل کوانٹم تاریں Quantum wires ہیں جو انسولیٹر قطرے کے گرد لپٹی ہوتی ہیں (دیکھئے تصویر 2a)۔جب اس قطرے کے الیکٹران دو جہتوں تک محدود ہوتے ہیں اور انہیں ایک مضبوط مقناطیسی میدان کی عمودی سمت میں رکھا جاتا ہے تو الیکٹرونک ویو فنکشنز کی ٹوپولوجیکل خصوصیات کے نتیجے میں قطرے کی سطح پر یہ کوانٹم تاریں ابھرتی ہیں۔



ٹوپولوجیکل انسولیٹروں پر کام اس خیال سے شروع ہوا کہ کوانٹم ہال اثر Quantum Hall Effect جو مقناطیسی میدان کی موجودگی میں دو جہتی الیکٹرانوں کے نظام میں پیدا ہوتا ہے وہ میکروسکوپک مقناطیسی میدان کی غیر موجودگی میں جالی lattice پر حرکت کرنے والے الیکٹرانوں کے لیے بھی ممکن ہے۔1980 کی دہائی کے آخر میں یہ پیش گوئی کی گئی تھی کہ اصولی طور پر خارجی مقناطیسی میدان کے بجائے محض جالی پر حرکت کرنے والے الیکٹران بھی کوانٹم ہال اثر

تشکیل دے سکتے ہیں۔ حالیہ پیش رفت کے مطابق اسکی وجہ اسپن مدار تعامل spin-orbit coupling ہے جو کہ ایک نسبتی مظہر ہے (یعنی نظریہ نسبیت کے اصول لاگو ہوتے ہیں)۔ کرسٹل میں موجود الیکٹران کی اسپن اور مدار کی حرکتوں میں تعامل ہونے سے سپن پر منحصر ایک قوت جنم لیتی ہے جو کہ غیر مقناطیسی مادے میں بھی مقناطیسی مظاہر پیدا کر سکتی ہے۔

اگرچہ سپن مدار تعامل میں مطلوبہ سمٹری موجود نہیں ہوتی (یعنی یہ خارجی مقناطیسی میدان کے برعکس ٹائم ریورسل سمٹری کو نہیں توڑتا) لیکن 2003 کے آس پاس کچھ سادہ ماڈلز کو متعارف کرایا گیا تھا جن میں یہ تعامل، کوانٹم اسپن ہال اثر کا باعث بن سکتا ہے۔ کوانٹم سپن ہال اثر میں مخالف سپن مومینٹم (جسے عام طور پر اسپن اپ اور اسپن ڈاون کہا جاتا ہے) رکھنے والے الیکٹران خارجی مقناطیسی میدان کی عدم موجودگی میں قطرے کے کنارے ایکدوسرے کے مخالف سمت حرکت کرتے ہیں(تصویر 2b)۔ یہ سادہ ماڈل ٹوپولوجیکل انسولیٹر سمجھنے کی طرف پہلا قدم تھا۔ لیکن یہ واضح نہیں تھا کہ یہ ماڈل کتنے حقیقت پسندانہ ہیں۔ کیونکہ حقیقی مادے میں اسپن اپ اور اسپن ڈاؤن والے الیکٹرانوں کا باہمی اختلاط ہوتا ہے اور کوئی اسپن کرنٹ ایسا نہیں جو ان میں باقی رہ سکے۔ یہ بھی واضح نہیں تھا کہ آیا تصویر 2b میں قطرے کے کنارے کی حالت چند ایک نجاستوں impurities کی موجودگی میں بھی قائم رہ سکے گی یا نہیں (کیونکہ حقیقی مادے میں آئنز کا جال lattice ہی نہیں بلکہ کچھ نجاستیں بھی شامل ہوتی ہیں)۔

2005 میں کین اور میلے Kane-Mele نے ایک اہم نظریاتی پیش رفت کی۔ انہوں نے اسپن کرنٹ کی بقاء conservation کے بغیر زیادہ حقیقت پسندانہ ماڈلز کا استعمال کیا اور دکھایا کہ

کس طرح کوانٹم اسپن ہال اثر میں کچھ حقیقت موجود ہو سکتی ہے۔ انہوں نے ایک نئی قسم کا ٹوپولوجیکل انویرینٹ تلاش کیا جو کسی بھی دو جہتی مادے کے لیے شمار کیا جا سکتا تھا اور جو اس بات کی پیشن گوئی کر سکتا تھا کہ کسی مادے میں سطح کی حالتیں surface states باقی رہیں گی یا نہیں۔ اس سے وہ یہ ثابت کر سکے کہ پچھلے کئی ماڈلز میں جہاں سطح کی حالتیں مستحکم نہیں تھیں انکے برعکس کچھ حقیقت پسندانہ دو جہتی مادے موجود ہیں جن میں مقناطیسی میدان کی عدم موجودگی میں بھی سطح کی حالتیں مستحکم ہیں۔ انکی تحقیق کے نتیجے میں پہلی مرتبہ دو جہتی ٹوپولوجیکل انسولیٹر کا مکمل فہم حاصل ہوا۔ اس غیر مقناطیسی انسولیٹر کے کنارے کم درجہ حرارت پر یک جہتی الیکٹرانک تاروں کی طرح کام کرتے ہیں، جیسا کہ کوانٹم ہال اثر میں ہوتا ہے۔

اس کے بعد، Bernevig، Hughes اور Zhang نے ایک نظریاتی پیشن گوئی کی کہ کناروں پر کوانٹائزڈ چارج کنڈکٹنس Quantized Charge Conductance رکھنے والا دو جہتی ٹوپولوجیکل انسولیٹر (Hg, Cd) Te ہے جو کوانٹم ویلز Quantum Wells کی شکل میں بنایا جا سکتا ہے۔ 2007 میں صفر مقناطیسی میدان میں کوانٹم ہال نما سطح کی دریافت میں کوانٹائزڈ چارج کنڈکٹنس کا تجربہ ممکن ہوگیا۔ یہ تجربات کوانٹم ہال کے تجربات سے ملتے جلتے ہیں صرف اس فرق کے ساتھ کہ یہ دو جہتی مادے (کوانٹم ویلز) کم درجہ حرارت پر پائے جاتے ہیں اور انہیں مصنوعی طریقوں سے بنایا جاتا ہے لیکن یہ کوانٹم ہال سے اسطرح مختلف ہیں کہ ان میں کسی مقناطیسی میدان کی ضرورت نہیں ہے۔

تین جہتوں کی جانب سفر

اگلی اہم نظریاتی ترقی 2006 میں ہوئی اور یہ اس بات کا احساس تھا کہ اگرچہ عام طور پر کوانٹم ہال اثر سہ جہتی حالت میں نہیں پایا جاتا تاہم ٹوپولوجیکل انسولیٹر تین جہتوں میں بھی ایک خاص انداز سے پایا جا سکتا ہے۔ اگرچہ ایک سہ جہتی 'کمزور' ٹوپولوجیکل انسولیٹر کو دو جہتی انسولیٹروں کی پرتوں کے ذریعے تشکیل دیا جا سکتا ہے جیسا کہ تہہ دار مادوں والے کوانٹم ہال اثر میں ہوتا ہے لیکن اس عمل کے نتیجے میں بننے والی حالت نجاستوں کی موجودگی میں مستحکم نہیں رہتی اور اس کی طبیعات عام طور پر دو جہتی مادوں سے ملتی جلتی ہے۔ کمزور ٹوپولوجیکل انسولیٹروں میں، ایک سرکاؤ dislocation (کرسٹل میں ایک لکیر کی طرح کی خرابی) کی موجودگی میں کوانٹم اسپن ہال اثر کے کنارے جیسی کوانٹم تار ہمیشہ موجود رہے گی (جس پر پہلے بحث کی گئی ہے) جو سہ جہتی مادے میں دو جہتی ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی طبیعات کا مشاہدہ کرنے کا باعث بن سکتی ہے۔

تاہم، ایک 'مضبوط' ٹوپولوجیکل انسولیٹر کا پایا جانا بھی ممکن ہے جو دو جہتی حالت کے ساتھ زیادہ لطیف تعلق رکھتا ہے اور وہ تعلق یہ ہے کہ دو جہتوں میں ٹائم ریورسل سمٹری کو توڑ کر عام انسولیٹروں اور ٹوپولوجیکل انسولیٹروں کو آسانی سے ایکدوسرے کے ساتھ ہموار طریقے سے smoothly جوڑا جا سکتا ہے۔ اس طرح مسلسل جوڑ توڑ کو ایک سہ جہتی بینڈ کی ساخت بنانے کے لیے استعمال کیا جا سکتا ہے جس میں ٹائم ریورسل سمٹری نہیں ٹوٹتی اور جو تہہ دار بھی نہیں ہے اور ٹوپولوجی کے لحاظ سے غیر معمولی non-trivial ہے۔ اس مضبوط ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی سطح پر دھاتی حالتیں باقی رہتی ہیں اور یہی وہ مادہ ہے جو تمام تجرباتی سرگرمیوں کا مرکز بنا ہوا ہے۔

یہاں سپن مدار تعلق دوبارہ درکار ہے اور اسپن کے تمام اجزاء کو باہم ملانا ضروری ہے۔ دوسرے لفظوں میں، دو جہتی حالت کے برعکس علیحدہ اسپن اپ اور اسپن-ڈاؤن الیکٹرانوں سے سہہ جہتی مضبوط ٹوپولوجیکل انسولیٹر حاصل کرنے کا کوئی طریقہ موجود نہیں ہے۔ اگرچہ اس سے سہہ جہتی ٹوپولوجیکل انسولیٹر کے بلک کی طبیعات سمجھنا مشکل ہو جاتا ہے (آگے صرف مضبوط ٹوپولوجیکل انسولیٹر پر بات کی جائے گی)، تاہم اس کی دھاتی سطح کا تصور سمجھنا قدرے آسان ہے۔

ٹوپولوجیکل انسولیٹروں کی سطح پر بننے والی غیر معمولی دھات کو بلک انسولیٹر Bulk Insulator سے ٹوپولوجیکل خصوصیات 'وراثت میں' ملتی ہیں۔ اس بلک - سطح تعلق کا سب سے سادہ مظہر ایک ہموار سطح پر ہوتا ہے، جہاں مومینٹم سطح کے اوپر well defined ہوتا ہے۔ سطح کے ساتھ ہر مومینٹم کے پاس صرف ایک سپن حالت ہوتی ہے جو کہ فرمی سطح Fermi surface پر موجود ہوتی ہے اور مومینٹم کی فرمی سطح پر گردش کے نتیجے میں سپین کے ویکٹر میں بھی گردش پیدا ہوتی ہے۔ جب سطح پر خرابی یا نجاست شامل کی جائے تو ان سطحوں میں سکیٹرنگ scattering ہوگی لیکن اہم بات یہ ہے کہ بلک انسولیٹر کی ٹوپولوجیکل خصوصیات دھاتی سطح کی حالت کو ختم نہیں ہونے دیتیں اور ان دھاتی حالتوں میں خلا gap پیدا نہیں ہوتا نہ ہی یہ ایک جگہ پر منجمد localized ہوتی ہیں۔ ان دو نظریاتی پیشین گوئیوں، یعنی سطحی حالت کی الیکٹرانک ساخت اور اس کے دھاتی رویے پر نجاستوں کے گہرے اثرات کے باعث پچھلے دو سالوں میں سہہ جہتی ٹوپولوجیکل انسولیٹروں پر بے بہا تجرباتی کام ہوا ہے۔

تجرباتی ادراکات

سب سے پہلے دریافت ہونے والا ٹاپولوجیکل انسولیٹر بسمتھ اور اینٹی منی کا مرکب تھا، جس کی سطح پر بننے والے غیر معمولی بینڈز کو زاویہ حل شدہ فوٹو ایمیشن سپیکٹروسکوپی (ARPES) تجربہ میں بنایا گیا تھا۔ اے آر پی ای ایس کے تجربات میں، ایک کرسٹل سے الیکٹران کو نکالنے کے لیے ایک اعلیٰ توانائی والا فوٹان استعمال کیا جاتا ہے، اور پھر سطح یا بلک الیکٹرانک ڈھانچہ کا تعین خارج ہونے والے الیکٹران کے مومینٹم کے تجزیہ سے کیا جاتا ہے۔ اگرچہ اس مرکب کی سطح کی ساخت پیچیدہ پائی گئی، تاہم اس کام نے دوسرے ٹاپولوجیکل انسولیٹروں کی تلاش شروع کی۔

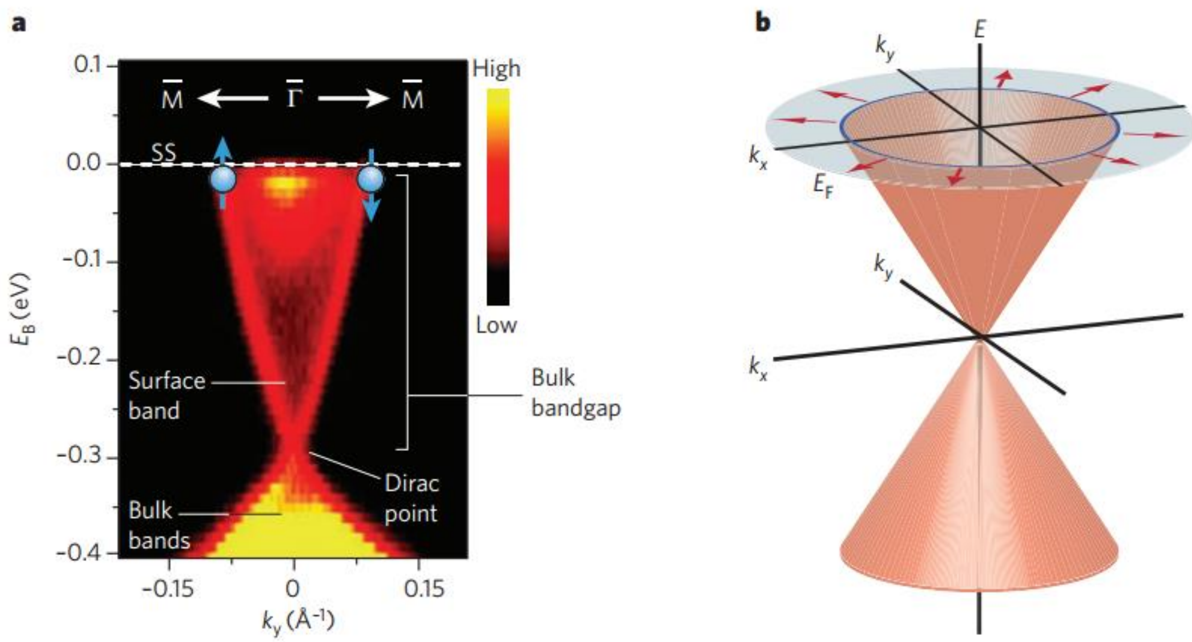
ٹاپولوجیکل انسولیٹر بنانے کے لیے، اسپن-مدار کپلنگ اسقدر مضبوط ہونی چاہیے کہ وہ الیکٹرانک ڈھانچے کو نمایاں طور پر تبدیل کرنے کے لیے کافی ہو، جس سے پتہ چلتا ہے کہ بھاری عناصر اور چھوٹے بینڈ گیپ والے سیمی کنڈکٹر سب سے بہتر امیدوار ہیں- یہ تجویز دو نکات پر مبنی ہے۔ اول، سپن-مدار کپلنگ صرف بھاری عناصر کے لیے مضبوط ہوتی ہے۔ دوم، اگر بینڈ گیپ کی مقدار اسپن-مدار کپلنگ کے توانائی کے پیمانے سے بہت زیادہ ہو تو پھر یہ کپلنگ مادے کی حالت کو تبدیل نہیں کر سکے گی۔ ٹاپولوجیکل انسولیٹروں کی تلاش کا حتمی مرحلہ بسمتھ اور سیلینیم اور بسمتھ اور ٹیلوریم کے مرکبات کی حالیہ دریافت ہے۔ یہ 'اگلی نسل' کے دونوں مرکبات ٹاپولوجیکل انسولیٹر رویے کو ظاہر کرتے ہیں جو کہ بسمتھ اور اینٹی منی کے مرکب سے زیادہ درجہ حرارت یعنی اعشاریہ ایک سے زیادہ کے بلک بینڈ گیپ رکھتے ہیں، اور ان مرکبات کی سطح نہایت سادہ ہے۔ یہ سادہ سطح نہ صرف ٹوپولوجیکل انسولیٹر کے نظریہ کی مزید تصدیق فراہم کرتی ہے بلکہ اس تجربہ کے علاوہ بہت سے دیگر تجربات کے امکان رکھتی ہے، جن میں سے کچھ کو ذیل میں بیان کیا گیا ہے۔ مزید بر آں، بڑے

بینڈ گیپ کا مطلب ہے کہ ان تجربات کو انتہائی کم درجہ حرارت پر کرنے کی ضرورت نہیں ہے۔ ان مادوں میں ایک اہم پیچیدگی یہ پائی جاتی ہے کہ، خاص طور پر وہ تجرباتی تکنیکیں جن کا استعمال کرتے ہوئے بلک اور سطحی حالتوں (اے آر پی ای ایس کے برعکس) کے درمیان براہ راست فرق نہیں ہو پاتا، ان کے بلک میں موجود نجاستوں کے سبب کچھ برقی بہاؤ بہر حال بلک میں باقی رہتا ہے (یاد رہے کہ بلک میں اسے مکمل طور پر ختم ہونا چاہیئے)۔

گرافین کے ہم شکل

تصویر نمبر 3 میں بسمتھ اور سلینیم کے مرکب کی پیمائش شدہ سطح کی حالت بشمول الیکٹران کی سپن اور اسی کا ایک نظریاتی ماڈل دکھایا گیا ہے۔ اگلی نسل کے ٹاپولوجیکل انسولیٹر کی سطح کی حالت کا گرافین کے الیکٹرانک ڈھانچہ کی ڈیراک حد، جس میں توانائی اور مومینٹم راست متناسب ہوتے ہیں، سے گہرا تعلق ہے (اور اسے ڈیراک کون کے نام سے جانا جاتا ہے)۔ گرافین، جو کاربن ایٹموں کی ایک دو جہتی تہہ پر مشتمل ہوتی ہے، حالیہ برسوں میں تحقیق کا ایک انتہائی فعال موضوع رہا ہے۔

ساختی طور پر گرافین دو جہتوں میں پایا جانے والا سب سے بہترین مادہ ہے، اور الیکٹرانک طور پر اس کا ڈھانچہ بھی توانائی اور مومینٹم کے راست متناسب تعلق جیسا ہے، اس لئے گرافین اور ٹاپولوجیکل انسولیٹر کے درمیان ایک دلچسپ رشتہ ہے۔ ٹاپولوجیکل انسولیٹر کی سطح اور گرافین



کے درمیان بنیادی فرق یہ ہے کہ ٹاپولوجیکل انسولیٹر میں صرف ایک ڈیراک پوائنٹ ہوتا ہے (یا اسے ڈیراک وادی بھی کہتے ہیں) اور کوئی اسپن ڈیجنریسی نہیں، جبکہ گرافین کے دو ڈیراک پوائنٹس ہیں اور سپن ڈیجنریسی بھی ہوتی ہے۔ اس فرق کے دوررس نتائج ہیں، جس میں ایسے نئے ذرات پیدا کرنے کا امکان بھی شامل ہے جن کا اطلاق کوانٹم کمپیوٹنگ میں ہوتا ہے۔

اضافی ڈیجنریسی کی عدم موجودگی کا ایک اور قابل ذکر نتیجہ جو ٹنلنگ مائیکروسکوپی کے تجربے کو اسکین کر کے پتہ لگایا گیا وہ یہ تھا کہ سطح پر نقائص یا شگافوں کے قریب ہونے والی انٹرفیئرنس سے پتا چلتا ہے کہ الیکٹران سکیٹرنگ کے دوران کبھی بھی مکمل طور پر منعکس نہیں ہوتے۔ یہاں تک کہ اگر نجاستوں کی مقدار بڑھ بھی جائے اور الگ الگ سکیٹرنگ والی

تشریح لاگو نہ ہو تب بھی سطح کی حالتیں دھاتی پن کا مظاہرہ کرتی رہتی ہیں۔ اینڈرسن لوکلائزیشن کے باوجود دھاتی سطح کا باقی رہنا (یعنی کہ مضبوط نجاست کے نتیجے میں ایک موصل حالت کا قیام) ایک ٹاپولوجیکل انسولیٹر کی سطح اور دیگر مادوں جیسے کہ نوبل دھاتوں میں پائی جانے والی 'حادثاتی' سطح کے درمیان اہم فرق ہے۔ نجاستوں کی موجودگی میں بھی مستحکم رہنے والی دھاتی حالتوں کے علاوہ، اب یہ بھی سمجھا جا چکا ہے کہ ٹاپولوجیکل انسولیٹر، کم از کم کچھ 2D ماڈلز میں، انہی نجاستوں کا نتیجہ ہے۔ گرافین میں اس کا ایک محتاط ورژن موجود ہے جو کہ ایک ہموار پوٹینشل سے سکیٹرنگ کا نتیجہ ہے، لیکن حقیقی گرافین میں مضبوط نجاستوں کی موجودگی میں سطح کی ان دھاتی حالتوں کا بگاڑ شروع ہو جاتا ہے۔

شروع شروع میں گرافین کے مقابلے میں ایک ٹوپولوجیکل انسولیٹر کو چند مقاصد کے لئے استعمال کرنے میں ایک نقصان ہوتا تھا۔ گرافین میں کاربن کے ایٹموں کی کیمسٹری کے باعث فرمی توانائی فطری طور سے ڈیراک پوائنٹ (یعنی جہاں توانائی کے بینڈز ایک دوسرے کو چھوتے ہیں) پر موجود ہوتی ہے جہاں توانائی کی حالتوں کی کثافت صفر ہو جاتی ہے۔ اس کا مطلب یہ ہوا کہ گرافین میں برقی ذرات کی حرکت کو بیرونی برقی میدان کی مدد سے بآسانی قابو کیا جا سکتا ہے اور یوں گرافین بنیادی سائنس سمجھنے کے علاوہ مائیکروالیکٹرانکس میں بھی بہت مفید بن جاتی ہے۔ دوسری طرف ایک ٹوپولوجیکل انسولیٹر میں فرمی توانائی کا ڈیراک پوائنٹ پر ہونا لازمی نہیں ہے۔ تاہم حال ہی میں سطح اور بلک کی کیمسٹری کو تبدیل کرتے ہوئے بسمتھ اور سلینیم کے مرکب میں فرمی توانائی کو ڈیراک پوائنٹ پر لایا گیا ہے۔ کیمیکل پوٹینشل (جو صفر کیلون درجہ حرارت پر فرمی توانائی ہی ہے) کو قابو کرنا بہت سے مقاصد کے لئے اہم ہے اور علاوہ اس کے ایک ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی باریک تہہ کے واسطے سے ایک ٹوپولوجیکل ایکسائٹون کنڈینسیٹ پیدا کرنے کی تجویز بھی دی گئی ہے۔ یہ کنڈینسیٹ دراصل الیکٹران اور ہولز کے

جوڑوں کی ایک سپر فلوئڈ حالت ہے جو سپر فلوئڈ بھنور کے گرد الیکٹرانوں کی ایک باؤنڈ حالت ہے۔

مادی مشکلات

ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی نینو پیمانے پر نشوونما کے سلسلے میں ہونے والی پیش قدمی میں سے دو کا ذکر یہاں لازمی ہے۔ بسمتھ اور سیلینیم کے نینوربن nano ribbon بنالئے گئے ہیں جن کی مدد سے دھاتی حالت میں Ahronov-Bohm اثر کا مشاہدہ کیا جا سکتا ہے جس میں کہ نینوربن کی لمبائی کی سمت میں مقناطیسی میدان پیدا کیا جاتا ہے اور مالیکیولر شعاعوں کے epitaxial طریقہ سے بسمتھ اور سیلنیم کی باریک تہوں کی افزائش کی جاتی ہے یہاں کہ یہ تہیں صرف ایک یونٹ سیل unit cell تک محدود ہوجائیں۔ اسطرح کے نینو پیمانے کی ساختوں کو سپنٹرانکس spintronics اور دوسرے شعبوں میں استعمال کیا جا سکتا ہے۔ مثال کے طور پر شکل ۳ میں ایک سپن ساخت دکھائی گئی ہے جسمیں ایک برقی کرنٹ ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی سطح کے متوازی از خود ایک غیر صفر سپن کی کثافت کو جنم دیتا ہے۔ ایک متفاوت پذیر ساخت جس میں ٹاپولاجیکل انسولیٹر کو فیرومیگنٹ ferromagnet سے ملایا جاسکتا ہے اور پھر ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی سطح سے ایک کرنٹ گزار کر فیرومیگنٹ کو بدل کر ایک سپن ٹارک آلے میں تبدیل کیا جا سکتا ہے جس سے پھر مقناطیسی میموری کا کام لیا جا سکتا ہے۔ اگلا اہم مرحلہ ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی سطح کی حالتوں پر برقی بہاؤ اور روشنی کے تجربات کی مدد سے انکی کنڈکٹیوٹی اور سپن کی خصوصیات کا پتا لگانا ہے اور اس کام کے لئے ایسے مادوں کی ضرورت ہے جن کے بلک میں بقیہ رہ جانے والی کنڈکٹیوٹی صفر کی جا سکے تاکہ خالص سطح کی حالتیں میسر ہوں۔

نوزائیدہ شعبہ

ٹوپولوجیکل انسولیٹرز کی اہم خصوصیات کی ایک اور صورت پر بہت سے نئے تجربات ہونے جا رہے ہیں اور یہ صورت 1980 سے ذراتی طبیعات کی تحقیق سے متعلق رہی ہے۔ بہت سالوں سے یہ معلوم رہا ہے کہ ایک انسولیٹر کی اندرونی حالت میں برقی اور مقناطیسی میدان آپس میں جڑے ہوئے ہوتے ہیں۔ ٹوپولوجیکل انسولیٹر میں ایسی جڑت کوانٹائزڈ quantized شکل میں پائی جاتی ہے اور اسے پہلے پہل ذراتی طبیعات پر کام کرنے والوں نے ایک مجوزہ ذرے ایکزیون axion کے برقی اور مقناطیسی میدان سے جوڑ توڑ کے تجزیے میں استعمال کیا تھا۔

ذراتی طبیعات اور سپر فلوئڈ

کنڈینسڈ میٹر فزکس کے شعبے میں اکثر مادی حالت کی تعریف، اس مادے پر خارجی اثرات کے تناظر میں کی جاتی ہے۔ مثلاً، ٹھوس مادہ کی تعریف یہ ہے کہ خارجی قوت کے زیر اثر ٹھوس مادہ غیر صفر سختی stiffness دکھاتا ہے۔ ایسے ہی ایک سپر کنڈکٹر کی تعریف یوں کی جاتی ہے کہ یہ مقناطیسی میدان کو قطعی دفع کرتا ہے جسے مائزنر اثر Merisner effect کہتے ہیں۔ ایسی تعریفات براہ راست تجربات سے ماخوذ ہوتی ہیں اور مادے کی اندرونی انتہائی چھوٹی تفصیلات سے ماوراء ہوتی ہیں (یعنی یہ تفصیلات اس بڑے اثر کو تبدیل نہیں کرتیں)۔ یونہی پتا چلتا ہے کہ 1980 کی دہائی میں ایکزیون نامی ذرے کی برقی حرکیات کو سمجھنے کے عمل میں ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی تعریف ایسے ہی خارجی اثر کی مدد سے کی گئی تھی۔ ایکزیون کی برقی حرکیات، روزمرہ کی برقی حرکیات سے یوں مختلف ہے کہ اس میں برقی میدان اور مقناطیسی میدان کو باہم جوڑ کر مساواتوں Lagrangian کا حصہ بنایا جاتا ہے۔ اس مساوات کے صرف دو ہی ایسے نتائج نکلتے ہیں جن میں زمان کی سمٹری قائم رہ سکتی ہے اور یہ دو نتائج عمومی انسولیٹر اور ٹوپولوجیکل

انسولیٹر ہیں۔ لہذا، ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی تعریف یوں کی جائے گی کہ یہ وہ مادہ ہے جنکی اندرونی ساخت ایکزیون کی برقی حرکیات کو جنم دیتی ہے بالکل جیسے عمومی انسولیٹر کی اندرونی ساخت، عمومی برقی حرکیات پر اثر کرتی ہے جس میں برقی میدان خود اپنے ہی ساتھ (نہ کہ مقناطیسی میدان کے ساتھ) جڑتا ہے۔

برقی و مقناطیسی جڑت والی مساوات سے بہت سی پیش گوئیاں کی گئی ہیں، جیسے کہ ٹوپولوجیکل انسولیٹر میں مقناطیسی اکائی monopole جیسا اثر اور مسلسل تبدیل ہوتی ہال کنڈکٹیوٹی والی سطح کی حالتیں ہیں۔ مفید مقاصد کے حوالے سے سب سے اہم پیش گوئی شاید ایک سادہ مقناطیسی برقی اثر ہے جس میں ایک برقی میدان سے ایک مقناطیسیت اور یونہی مقناطیسیت سے پھر برقی میدان پیدا ہوتا ہے۔ یہ اثر دیگر مادوں جیسے ملٹی فیروئک multiferroic مادوں کی نسبت زیادہ تیز اور جلد دوبارہ تیار ہوتا ہے اور اسکی وجہ یہ ہے کہ یہ اثر الیکٹران کی مداروی حرکت سے (نہ کہ سپن حرکت سے) پیدا ہوتا ہے ۔ نظریاتی طور پر ایک ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی تعریف یوں کی جا سکتی ہے کہ خارجی مقناطیسی میدان کے زیر اثر اس کے بلک میں پولرائزیشن کس قدر تبدیل ہوتی ہے اور دیگر مادوں میں اس اثر کی مقدار اسے پتا چلتا ہے کہ یہ اثر ٹوپولوجیکل انسولیٹر میں مشاہدہ کرنا ممکن ہے۔

ایک اور حالیہ نظریاتی پیش رفت یہ تھی کہ سہہ جہتی ٹوپولوجیکل انسولیٹروں سے ملتے جلتے اثرات ایسے مادوں میں بھی دیکھے جا سکتے ہیں جن کی سمٹری مندرجہ بالا غیر مقناطیسی مادوں سے مختلف ہو۔ ایسے دیگر ٹوپولوجیکل انسولیٹر اور سپر کنڈکٹر مادوں کی تجرباتی تلاش ایک بہت بڑی کامیابی ہو سکتی ہے۔ اس شعبے میں ہونے والے کام سے سپر فلوئڈ ہیلیم He-3 کی خصوصیات کو از سر نو سمجھنے میں مدد ملی۔ سپر فلوئڈ ہیلیم ایسا مادہ ہے جس میں صفر برقی بار رکھنے والے

فرمیون fermionic ایٹموں سے کوپر جوڑے Cooper pairs بنتے ہیں اور اس سپر فلوئڈ کی نیم ذراتی quasiparticle حالتیں زبردست خصوصیات کی حامل ہیں جنکا گہرا تعلق ٹوپولوجیکل انسولیٹر کے الیکٹرانوں سے ہے۔ ایسی نیم ذراتی حالتوں کی براہ راست تجرباتی دریافت ایک اہم چیلنج ہے۔

نووارد ذرات اور کوانٹم کمپیوٹنگ

کسی ٹوپولوجیکل انسولیٹر کو ایک سپر کنڈکٹر سے جوڑا جائے تو انکی درمیانی سطح پر ایسے "نووارد" emergent ذرے پیدا ہو سکتے ہیں جو ان دونوں مادوں میں الگ الگ قائم نہیں رہ سکتے۔ کسی بھی دوسری دھات کی مانند، ایک ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی سطح بھی سپر کنڈکٹر بن جاتی ہے جب اسے کسی دوسرے سپر کنڈکٹر کے قریب رکھا جائے۔ اسے قربت کا اثر proximity effect کہتے ہیں۔ تاہم ٹوپولوجیکل انسولیٹر کی سطح ایک نئی حالت ہے۔ اگر بھنور بناتی ایک لائن، سپر کنڈکٹر سے ٹوپولوجیکل انسولیٹر میں داخل ہو، تو صفر توانائی کا حامل ایک میورانا فرمیون Majorana fermion بھنور کے اندرون میں اٹک جاتا ہے۔ عمومی سپر کنڈکٹر میں بننے والے بھنور کے اندرون کے برعکس، یہ میورانا فرمیون ایسے کوانٹم اعداد رکھتا ہے جو ایک عام الیکٹران سے مختلف ہیں (یاد رہے کہ الیکٹران بھی ایک فرمیون ذرہ ہے)۔ میورانا فرمیون، خود اپنا ضد آپ ہے (الیکٹران کا ضد ہول ہے)، اس کا برقی بار صفر ہے (الیکٹران کا برقی بار صفر نہیں ہے) اور بہت سے پہلوؤں سے یہ الیکٹران کا 'نصف' ہے۔ اس تجویز سے پیدا ہونے والے جوش و خروش کی بہت سی وجوہات ہیں۔ اول، میورانا فرمیون کو براہ راست مشاہدہ کیا جا سکتا ہے جو کہ ذراتی طبیعات اور کنڈینسڈ میٹر فزکس کا دیرینہ مقصد ہے۔ دوم، میورانا فرمیون کی بدولت ٹوپولوجیکل کوانٹم کمپیوٹر ایک قدم کی دوری پر رہ جائیں گے۔ یہ ایسے کوانٹم کمپیوٹر ہیں جن میں غلطی کا امکان غیر معمولی طور پر کم ہو جائے گا کیونکہ نیم ذراتی حالتیں،

ایک خاص قسم کی کوانٹم شماریات رکھتی ہیں جن میں نان ایبلین Non-Abelian الجبرا لاگو ہوتا ہے۔ مزید پیچیدہ مادوں میں شاید میورانا فرمیون سہہ جاتی مادوں میں ایسی حالتوں کو جنم دیں جنھیں پوائنٹ ایکسائٹیشن point excitation کہتے ہیں۔

بہت عمومی طور پر دیکھیں تو کوانٹم ہال کی حالتوں میں ٹوپولوجیکل آرڈر کے بہت سے پہلو ہیں جنھیں ابھی تک ٹوپولوجیکل انسولیٹروں میں نہیں دیکھا جا سکا اور ان میں ایسی نیم ذراتی حالتیں جن میں برقی بار اور شماریات مختلف ہو، سب سے اہم ہیں۔ ابھی تلک ٹوپولوجیکل آرڈر کا پہلا چشمہ، یعنی مضبوط مقناطیسی میدان کے زیر اثر الیکٹرانوں کی دو جہتی گیس، خشک نہیں ہوا ہے۔ اس گیس کے حالیہ مطالعے میں گرافین میں پایا جانے والا فریکشنل کوانٹم ہال اثر شامل ہے اور اس کے انٹرفیرومیٹر Interferometry تجربات سے نان ایبلین شماریات کا مشاہدہ ممکن ہے۔ ایسی ٹوپولوجیکل حالتوں کی پیش گوئی بھی ہوئی ہے جو 'مایوس کن' frustrated سپن والے مادوں میں پائی جاتی ہیں۔ گزشتہ تین دہائیوں (1980 تا 2010) میں سیمی کنڈکٹر کے مرکبات میں مشاہدہ کئے جانے والے ٹوپولوجیکل اثرات سے پتا چلتا ہے کہ ابھی تک جو بھی دریافتیں ہوئی ہیں وہ ٹوپولوجیکل آرڈر کی اولین صورتیں ہیں اور ابھی مزید نئے ٹوپولوجیکل آرڈر بھی دریافت ہوں گے۔

مستقبل کی جانب

کنڈینسڈ میٹر فزکس کی بنیادوں میں ہونے والی دیگر پیش رفت کی طرح، ٹوپولوجیکل انسولیٹروں کی حالیہ دریافت مادے کی نئی تفہیم پر مشتمل نئے فوائد کا عندیہ ہے۔ ان مادوں کی سطح پر موجود غیر معمولی حالتیں (الیکٹرانکس کی طرح ایک نئے شعبے) اسپنٹرانکس یا مقناطیسی برقی آلات کو جنم دے سکتی ہیں۔ مزید یہ کہ، سپر کنڈکٹر کے ساتھ ملکر یہ ٹوپولوجیکل انسولیٹر،

ٹوپولوجیکل کوانٹم بٹس quantum bits کی تعمیر میں معاون ہو سکتے ہیں۔ ان ٹوپولوجیکل انسولیٹروں نے پہلے ہی نظریاتی کنڈینسڈ میٹر فزکس میں بے بہا نقوش چھوڑے ہیں اور یہ واضح کیا ہے کہ ٹوپولوجیکل اثرات، جنہیں اب تک محض کم درجہ حرارت، نچلی جہتوں اور مضبوط مقناطیسی میدانوں تک محدود سمجھا گیا تھا، خاص حالات میں عام بلک مادوں کی طبیعات بھی واضح کر سکتے ہیں!